

나노임프린팅 기술을 이용한 유연성 브래그 반사 광도파로 소자

김경조 · 이정아 · 오민철[†]

부산대학교 전자공학과 컴퓨터및정보통신연구소 나노바이오광소자연구실
⑧ 609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지

(2007년 3월 7일 받음, 2007년 4월 4일 수정본 받음)

저자의 소자 개발이 가능한 나노임프린팅 공정을 도입하여 510 nm 주기의 브래그 격자 구조를 가지는 폴리머 광도파로 소자를 제작하였다. 폴리머 격자 광소자의 온도 의존성을 감소시키기 위한 방법으로 플라스틱 박막으로 이루어진 유연성 기판상에 브래그 격자를 제작하는 것이 필요하다. 임프린팅 공정을 손쉽게 수행하기 위한 광도파로 구조를 채택하였으며, 코아와 클래딩의 굴절률이 각각 1.540, 1.430인 폴리머를 이용하여 코아 두께가 3 μm인 단일모드 광도파로 구조를 얻을 수 있었다. 유연성 기판 브래그 격자 광도파로 소자의 특성을 Si기판 브래그 격자 광도파로 소자와 비교하여 관측한 결과, 유연성 기판 도입에 따른 브래그 반사 소자의 성능 저하는 나타나지 않았다.

주제어 : Polymeric optical waveguide, Bragg reflection grating, Nano-imprinting, Flexible substrate

I 서 론

플라스틱 소재를 이용한 광소자 기술은 지난 10년간 저손실 광도파로 제작을 위한 폴리머 재료의 개발과 함께 광스위치, 광감쇄기 등의 광신호 처리용 집적광학 도파로형 소자에 관한 연구로 발전되어 왔으며, 최근에는 까다로운 신뢰성에 관련된 문제를 모두 해결하여 국내외 광통신 시스템에 직접 적용되어 사용되고 있는 단계까지 이르게 되었다.^[1] 폴리머 광소자는 구조의 단순함으로 인하여 제작공정이 간단하고 저가격으로 생산 가능한 장점을 가지고 있으며, 최근에는 폴리머 재료의 우수한 열광학적 특성을 이용한 가변 파장 필터와 같은 WDM광통신에 직접적으로 적용 가능하게 되었다. 특히 폴리머 재료의 특성을 이용한 나노임프린팅(nano-imprinting) 기술을 적용하여 광소자를 플라스틱 성형과 같은 단순한 공정으로 대량 생산할 수 있는 기술도 ETRI, 기계연구원 등의 기관을 포함하여 국내외적으로 활발히 연구 중에 있다.

브래그 격자는 광도파로 코아의 굴절율을 주기적으로 변조하여 특정 파장의 빛을 반사시키는 소자로서 광통신용 소자나 광센서 부품으로 활발히 연구되고 있다.^[2] 주기가 500 nm 정도인 브래그 격자 구조의 제작을 위해서는 레이저 간섭계를 이용하는 것이 일반적이다. 파장이 아주 짧은 electron beam을 이용하여 정밀하게 한 획 한 획을 그어서 격자 구조를 제작하기도 하지만 수 만개에 달하는 라인을 직접 electron beam으로 그리기 위해서는 상당한 시간이 소요된다. 한편 최근 들어 플라스틱 재료의 표면에 몰드를 이용하여 미세한 브래그 격자 구조를 손쉽게 찍어서 제작하는 나노임프린팅 공정의 개발이 활발히 이루어져 왔다.^[3,4] 브래그 격자는 대부분 선폭이 200 nm 정도이며 패턴의 깊이는 200~500 nm

정도이므로 나노임프린팅 공정을 적용하여 제작하기에 적합한 구조이다.

플라스틱 광소자의 특성을 최대한 살린 구조로서 유연성 기판 위에 제작된 플렉서블 광도파로 소자도 발표되었다.^[5] 기존의 공정과 유사하게 실리콘 기판상에서 광소자 제작을 완성한 뒤 최종적으로 플라스틱 기판을 떼어내는 방법을 이용하였다.^[6] 또한 CalTech의 Yariv 교수팀은 앞에서 설명한 플렉서블 광소자 공정을 이용하여 유연성 기판 상에 free standing ring resonator 구조의 폴리머 광소자를 제작하였다.^[7] 최근에는 플라스틱 기판 상에 제작된 브래그 반사 광도파로 소자의 온도 안전성을 보이는 실험 결과도 발표 되었다.^[8] 플라스틱 기판을 이용한 브래그 반사 소자는 기존의 Si 기판 위에 제작된 소자에 비해 향상된 온도 안전성을 보이고 있으나, 브래그 반사 스펙트럼 특성이 저하되는 문제점을 지니고 있었다.

본 논문에서는 플라스틱 기판 상에 우수한 균일성을 가지는 브래그 격자를 제작하기 위하여 post lift-off 공정을 적용하여 유연성 기판 브래그 격자 소자를 제작하였다. 그럼 1은 유연성 기판 상에 제작된 브래그 반사 광도파로 소자의 개념도이다. 소자는 단단한 실리콘 기판상에서 제작을 진행하고 마지막 단계에서 플라스틱 기판부를 떼어내는 방법을 이용함으로써 제작 공정의 신뢰성을 높이고 브래그 반사 소자의 특성이 저하되는 것을 방지할 수 있었다. 또한 임프린팅 공정을 이용하여 브래그 격자를 광도파로 소자와 접적화 시키기에 적합한 구조의 소자를 제작하여 특성을 살펴보았다.

II. 브래그 격자 광도파로 소자 설계

나노임프린팅 공정으로 격자 구조를 제작하는 경우 격자가 제작되는 필름의 두께를 정확하게 제작하기가 어렵다. 그러

[†] E-mail: mincheoloh@pusan.ac.kr

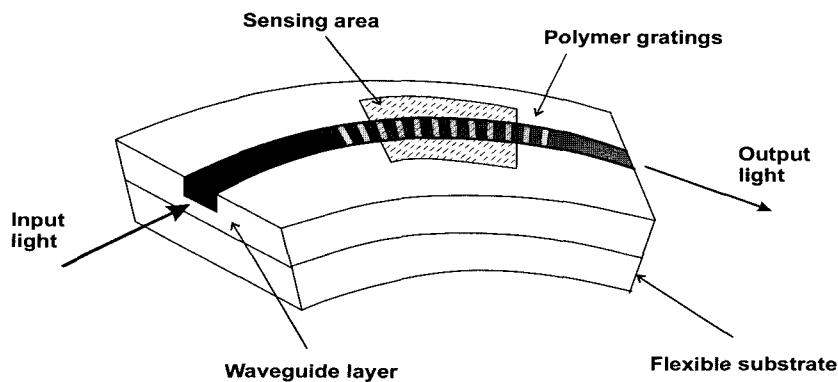


그림 1. 유연성 기판상에 제작된 브래그 격자 광도파로 소자의 개념도.

므로 본 연구에서는 브래그 격자층을 광도파로의 하부 클래딩 위에 제작하는 구조를 제안하였다. 이 경우 나노임프린팅으로 격자를 제작할 때 하부 클래딩 층의 두께 변화가 브래그 반사 특성에 미치는 영향은 미미하게 된다.

광도파로의 코아층과 클래드 층으로는 캠옵틱스사에서 제작한 굴절률이 1.430인 ZPU 폴리머와 굴절률이 1.540인 LPS 폴리머를 이용하였다. 브래그 격자 소자를 이용한 바이오센서를 최종 목표로 선정하였을 때 센서의 민감도를 향상시키기 위해 코아와 클래딩의 굴절률 차이를 가급적 크게 선정하게 되었다. 굴절률 차이가 매우 큰 재료를 이용하여 단일 모드 광도파로를 제작하기 위해서는 oversized rib structure를 이용하는 것이 유리하다.^[9] 이 경우 광도파로의 크기를 비교적 크게 유지하면서도 단일모드 도파 조건을 만족시킬 수 있게 된다. oversized rib structure의 waveguide 구조에서 유효굴절률법을 이용하여 설계를 해보면 코아 두께가 3 μm인 립구조 광도파로에서 1 μm 정도를 식각하여 들어갈 때 수평방향에 대한 유효굴절률 차이가 0.01 정도가 됨을 알 수 있다. 유효굴절률 차이가 0.01이 되면 6 μm 너비의 광도파로에서는 고차 모드가 발생하게 된다. 그러므로 실제 제작에서는 도파로 식각을 좀 더 적게 하거나 도파로의 너비를 좀 더 줄여서 제작하면 수평방향 단일모드 조건을 만족시킬 수 있다.

레이저 간섭계를 이용한 photoresist 격자패턴의 두께가 200 nm 정도로 한정될 때, 이 정도의 두께 차이로 인한 도파광의 유효굴절률 차이를 계산해 보면 그림 2와 같은 결과를 얻을 수 있다. 하부 클래딩 층에 제작된 격자 패턴은 코아층 재료가 덮개 되므로 격자에 의한 유효굴절률 변화는 코아층의 두께가 200 nm 정도 차이 나는 경우에 대하여 계산하여 나타낼 수 있으며, 계산된 값을 이용하여 transmission matrix method로 브래그 격자의 반사율을 계산할 수 있다. 그림 2의 계산 결과에서 코아층과 클래딩층의 굴절률 차이가 클수록 격자패턴에서의 유효굴절률 변화량이 커지는 것을 알 수 있다. 본 논문에서 제안한 광도파로 설계에서는 코아의 두께가 200 nm 차이 나는 구조에 대하여 유효굴절률 차이가 1.2×10^{-3} 이 됨을 확인하였다. 유효굴절률의 차이가 1.2×10^{-3} 인 경우 5 mm 길이의 grating으로부터 20 dB 이상의 반사율을 얻을 수 있게 된다.

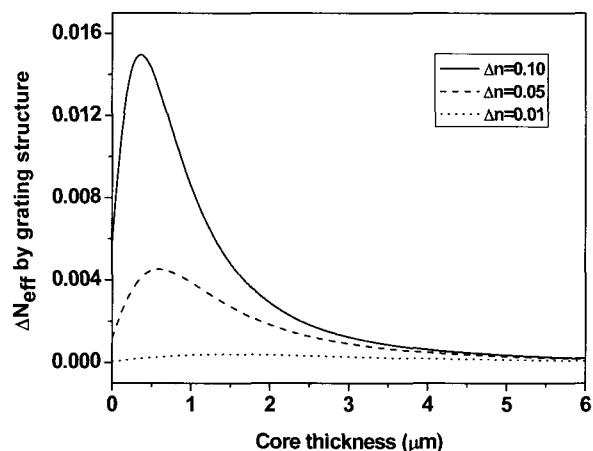


그림 2. 코아층의 두께가 200 nm 차이가 나도록 격자를 제작한 경우, 이로 인한 유효굴절률 변화 계산결과: 코아, 클래딩 재료의 굴절률 차이 Δn 이 0.10, 0.05, 0.01 인 경우에 대하여 코아 두께에 따른 유효굴절률 변화를 계산한 결과 코아 두께 3 μm 구조에서 0.001 이상의 ΔN_{eff} 를 얻게 됨을 확인하였다.

III. 유연성 브래그 반사 광도파로 소자 제작 공정

소자의 제작공정은 유연성 기판 제작, 브래그 격자 도파로 제작, 그리고 완성된 소자를 Si 기판에서 분리하는 공정으로 나눌 수 있다. 그림 3에서 개략적인 소자 제작 공정을 보여주고 있다. 유연성 기판 광소자의 제작을 위해서는 얇은 플라스틱 기판상에 골바로 소자를 제작하는 방법이 있으나, 브래그 격자와 같은 미세한 구조의 제작을 위해서는 본 연구에서 제안하고 있는 post lift-off 공정이 효과적이다. Post lift-off 공정은 SU-8 폴리머의 특성인 Au 표면과의 비접착성을 이용하여 소자를 제작하는 방법이다. 소자를 제작하는 공정 중에는 SU-8 폴리머가 Si 기판 표면에 결합되어 있다가 소자 제작이 끝난 후에는 Si 기판과 SU-8 폴리머가 접착된 부분을 잘라내어 Au 표면 위에 남아있던 폴리머 박막을 lift-off 시켜서 유연성 기판 광소자를 완성하게 된다.^[6]

우선 Au/Cr 이 증착된 Si 기판 상에 최종적으로 완성될 소자의 크기를 고려하여 AZ 5214 photoresist(PR)을 이용한

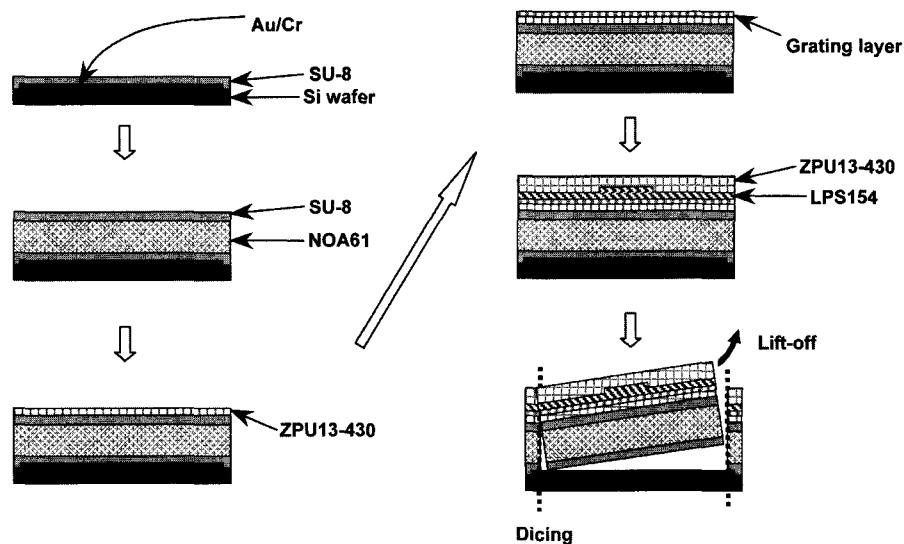


그림 3. 유연성 기판 브래그 반사 광도파로 제작 공정의 개략도: NOA61, SU-8으로 이루어진 유연성 기판 위에 하부 클래딩과 브래그 격자 구조를 완성한 후 코아와 상부 클래드를 제작하여 광도파로를 완성함: SU-8폴리머와 Au 표면과의 선택적 접착성을 이용한 post lift-off 공정을 통해 유연성 기판을 분리하여 소자를 완성함.

photo-lithography 방식으로 패턴을 형성하고 기판 외곽 부분의 Au/Cr을 제거하여 노출된 Si 표면에 SU-8 폴리머가 접착될 수 있도록 한다. 패터닝 된 Si 기판 위에 SU-8 2015를 cyclopentanone과 2 : 1 비율로 섞어 6 μm 두께로 코팅한 후 경화하고, 유연성 기판으로 사용될 NOA 61을 100 μm 두께로 코팅 후 경화한다. 마지막으로 SU-8을 6 μm 두께로 한번 더 코팅하여 폴리머 기판의 표면 경도를 증가시킨다.

다음으로 제작된 폴리머 다층 박막구조 위에 브래그 격자와 립 형태의 광도파로를 제작한다. 먼저 ZPU13-430을 10 μm 의 두께로 코팅하여 하부 클래딩을 제작한 후, 제작된 하부 클래딩 위에 Bragg grating을 제작한다. 두 종류의 Bragg grating을 레이저 빔 간섭계를 이용하는 공정과 나노임프린팅 공정을 이용하여 제작한다. 레이저 빔 간섭계를 이용하는 방식에서는 Ar laser(Coherent Innova70, 488 nm) 광원을 이용하여 holographic interference 방법으로 TSMR PR을 감광 시켜 격자 구조를 만든 후, O₂ 플라즈마를 이용해서 하부 클래딩에 격자패턴을 새겨 넣게 된다. 반면 나노임프린팅 방식에서는 Si 기판 상에 제작된 격자 패턴을 poly(dimethylsiloxane) (PDMS) mold로 복사한 뒤, 이를 경화되지 않은 하부 클래딩 폴리머 위에 덮고 UV를 조사하여 격자구조를 제작한다. Bragg 격자 제작 후 코아 물질인 LPS-154를 3 μm 두께로 코팅한다. 그 위에 AZ5214 PR로써 광도파로 패턴을 제작한 후 O₂ 플라즈마를 이용하여 0.8 μm ~ 0.9 μm 깊이로 식각한다. 이렇게 완성된 코아층 위에 ZPU13-430을 10 μm 두께로 코팅하여 상부 클래딩을 만들면 광도파로 구조가 완성된다.

완성된 유연성 브래그 격자 소자는 lift-off 공정을 통해 Si 기판과 분리하고 광 입출력을 위한 단면을 형성하기 위하여 다이싱 장비(Aaron, dicing process 6)를 이용한다. 이 때 SU-8 폴리머와 Si 기판이 접착되어 있는 부분을 절단하면 NOA61/

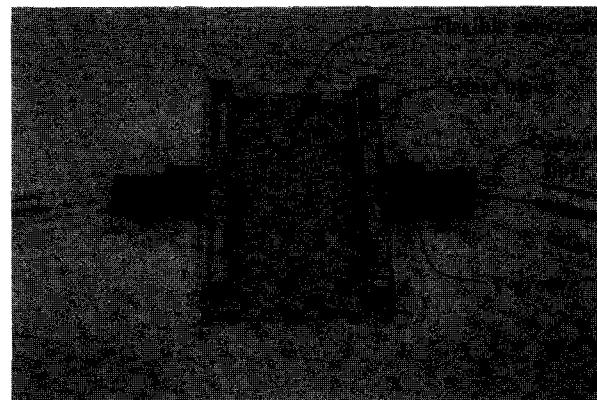


그림 4. 광섬유 입출력 피그테일을 완성한 유연성 기판 브래그 반사 광도파로: V-groove에 장착된 광섬유를 post lift-off 공정을 통해 완성된 소자의 입출력부에 정렬한 뒤 UV 경화 폴리머를 이용하여 접착시킴.

SU-8 층이 Au 표면과 분리되어 유연성 기판 브래그 반사 광도파로 소자가 완성된다. post lift-off 공정 이후에 stress release에 의해 유연성 기판이 약하게 휘어지는 현상이 발생하였지만 광도파로에서의 손실을 초래하지는 않았다. 다만 Bragg peak의 위치가 의도했던 위치에서 약간 이동하는 현상이 발생하였다. Post lift-off 공정 후의 유연성 기판 소자 자체만으로는 안정성이 떨어지며, 안정성을 유지해 줄 수 있는 패키징이 필요하다. 본 실험에서는 광도파로 끝부분에 유리 조각을 붙이고 도파로 단면을 폴리싱한 후 광섬유를 연결하는 패키징을 통해 소자의 안정성을 높였다. 그림 4는 광도파로의 입출력 부에 광섬유를 피그테일하여 패키징 된 소자의 사진이다.

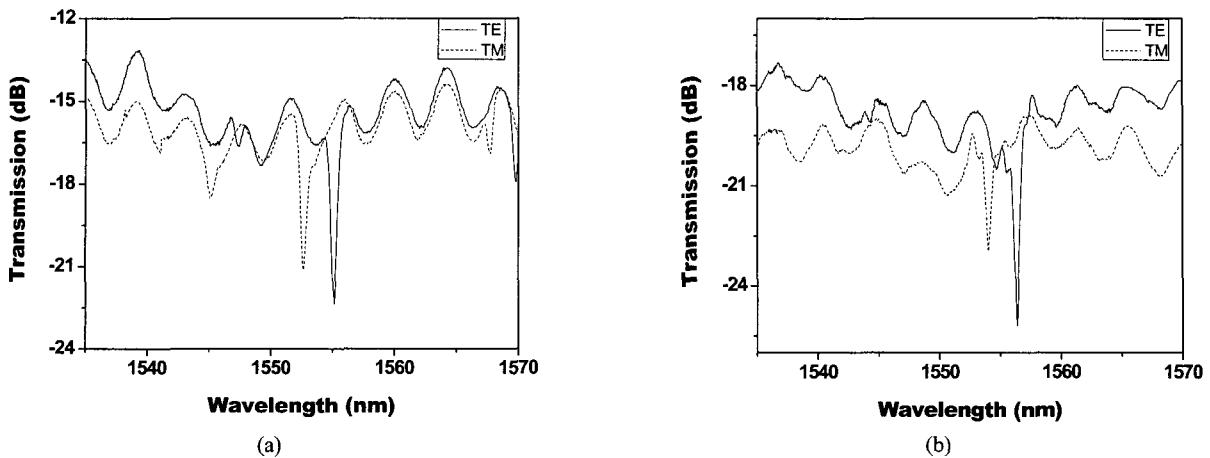


그림 5. (a) 유연성 기판 상에 레이저 빔 간섭계를 이용하여 제작한 브래그 반사 광도파로의 투과 스펙트럼.
 (b) 특성 비교를 위해 Si 기판 상에 제작한 소자의 투과 스펙트럼.

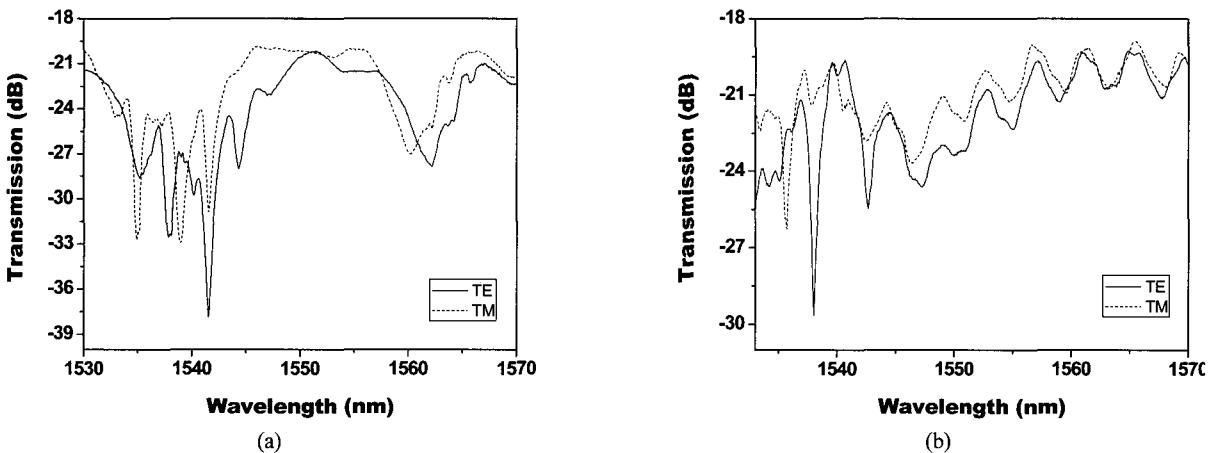


그림 6. (a) 유연성 기판 상에 PDMS mold nano-imprinting 공정을 이용하여 제작한 브래그 반사 광도파로의 투과 스펙트럼.
 (b) 특성 비교를 위해 Si 기판 상에 제작한 소자의 투과 스펙트럼.

IV. 유연성 기판 브래그 격자 소자의 특성 측정 결과

Erbium-Doped Fiber Amplifier(EDFA) 광원의 spontaneous emission을 이용하여 제작된 소자의 특성을 측정하였다. 본 EDFA 광원은 1530 nm ~ 1570 nm의 파장에 걸쳐서 -40 dBm 이상의 광파워를 지원한다. 소자 출력 스펙트럼 측정에 사용된 스펙트럼 분석기는 -70 dBm 이상의 sensitivity를 가지고므로 소자의 손실이 10 dB 미만인 경우 20 dB 이상의 Bragg reflection peak을 측정할 수 있다. 제작된 소자들은 유연성 기판상에 laser beam 간섭계를 이용하여 격자구조를 제작한 것과 나노임프린팅 공정을 통해서 격자 구조를 제작한 샘플로서 1550 nm의 브래그 반사 파장을 갖도록 제작하였다. 또한 Si 기판 상에서 브래그 격자 소자들을 동일한 공정으로 제작하여 유연성 기판 위에 제작된 소자들과 비교 분석하였다.

그림 5(a)는 유연성 기판 위에 레이저 빔 간섭계를 이용하여 브래그 격자를 제작한 광도파로 소자의 출력 스펙트럼이

다. 특성 비교를 위해 Si 기판을 이용한 소자의 결과를 그림 5(b)에서 보이고 있다. 유연성 기판에서의 소자가 나타내는 반사 파장의 위치는 TE, TM 편광에 대하여 각각 1555.13 nm, 1552.678 nm에서 나타났으며 반사 깊이는 약 -7 dB 정도가 되었다. Si 기판 상에 제작된 브래그 격자 소자에서의 반사 파장의 위치는 TE, TM 편광에 대하여 각각 1556.38 nm, 1554.03 nm에서 나타났으며 반사 깊이는 약 -6 dB 정도로 관찰되었다. 이러한 결과로부터 유연성 기판상에 제작된 브래그 반사소자가 Si 기판 상에서 제작된 브래그 반사소자에 비해 성능이 떨어지지 않음을 확인할 수 있었다. 하지만 두 경우 모두 브래그 격자 반사 깊이가 설계치 보다 많이 부족하였다. 이는 격자 패턴을 PR로 제작할 때에 패턴 현상이 충분히 이루어지지 않아서 격자 패턴에서 원하는 만큼의 두께 차이를 얻지 못하였기 때문으로 추정된다.

그림 6(a)와 (b)는 유연성 기판과 Si 기판 상에 각각 나노 임프린팅 공정을 통해 Bragg grating 을 형성하여 제작된 소자들에 대한 측정 스펙트럼 결과이다. 유연성 기판에서 제작

된 소자의 반사 파장의 위치는 TE, TM 편광에 대하여 각각 1541.56 nm, 1539.01 nm에서 나타났으며 반사 깊이는 약 -10 dB 정도로 관찰되었다. Si 기판상에 나노임프린팅 방법으로 제작된 소자의 반사 파장의 위치는 TE, TM 편광에 대하여 각각 1538.01 nm, 1535.71 nm에서 나타났으며 반사 깊이는 약 -10 dB 정도로 관찰되었다. 나노임프린팅 기술을 이용해서 제작된 소자의 결과를 살펴보면 레이저 빔 간섭계를 이용해 만든 소자와는 달리 전체적인 반사 파장의 위치가 목표로 했던 1550 nm의 파장에서 많이 벗어나고 여러 파장에서 반사가 나타남을 볼 수 있다. 이러한 현상은 soft mold를 이용한 nano-imprinting 공정에서 PDMS mold가 가지는 신축성으로 인한 격자 주기의 변형이 주된 요인이다. 또한 PDMS mold 접착 후 하부 클래딩의 외곽 부에 발생하는 높이 편차로 인해 코아층 두께의 불균일성과 광도파로 패턴 제작의 어려움이 있었으며 이는 광도파로의 추가적인 손실을 초래하였다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 임프린팅 공정 시 mold와 접촉하는 물질을 최대한 얇게 코팅하여 PDMS mold에 의해 발생하는 표면의 단자를 최대한 줄이는 방법을 도입하여야 한다.

V. 결 론

본 논문에서는 유연성 기판 위에 레이저 빔 간섭계를 이용한 공정과 나노임프린팅 공정을 이용하여 브래그 격자 패턴을 제작하였다. 코아와 클래딩의 굴절률이 각각 1.540, 1.430인 폴리머를 이용하여 코아 두께가 3 μm 인 oversized rib 구조의 단일모드 광도파로를 제작하였다. SU-8 폴리머가 가지는 Au 표면과의 비접착성을 이용하여 폴리머 기판에 소자를 제작한 뒤 최종적으로 떼어내는 post lift-off 공정을 개발하였다. 이와 같은 방법으로 격자의 주기가 균일하게 유지되는 브래그 격자 소자를 유연성 기판 위에 제작하였으며 실리콘 기판 위에 제작된 소자와 비교하여 브래그 반사 특성의 저하가 나타나지 않음을 확인하였다. PDMS mold를 이용하여 나노임프린팅으로 브래그 격자를 제작한 소자에서는 격자 주기의 불균일성으로 인해 나타나는 문제점을 확인하였으며 이를 보완하기 위한 연구를 진행할 계획이다. 또한 굴절률 차이가 큰 물질을 이용한 브래그 격자 광도파로 소자에서 코아층의 작은 두께 변화로 인해 유효굴절률이 크게 변하는 현상이 관측되었으며 이는 소자 성능의 재현성을 떨어뜨리는 결과를 초래하였다. 향후 브래그 반사 특성이 크면서도 공정의 협용 오차가 보장되는 최적화된 구조를 도출하고자 한다.

감사의 글

소자의 제작에 많은 조언과 도움을 주신 ChemOptics의 이형종 박사님과 노영욱 박사님께 감사드립니다. 이 논문은 BK21 프로그램과 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

- [1] Min-Cheol Oh, Wol-Yon Hwang, Young-Ouk Noh, Hyung-Jong Lee, and Seon-Gyu Han, "Reliable low-cost polymeric optical waveguide device," OECC/COIN2004, Yokohama Japan, 14F2-3, pp. 558-559, 2004.
- [2] Min-Cheol Oh, Myung-Hyun Lee, Joo-Heon Ahn, Hyung-Jong Lee, and Seon Gyu Han, "Polymeric wavelength filters with polymer gratings," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 72, No. 25, pp. 1559-1561, 1998.
- [3] Seh-Won Ahn, Ki-Dong Lee, Do-Hwan Kim, and Sang-Shin Lee, "Polymeric wavelength filter based on a Bragg grating using nanoimprint technique," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 17, No. 10, pp. 2122-2124, 2005.
- [4] W.-C. Chuang, C.-T. Ho, and W.-C. Wang, "Fabrication of a high-resolution periodical structure using a replication process," *Optics Express*, Vol. 13, No. 18, pp. 6685-6692, 2005.
- [5] Hyun-Chae Song, Min-Cheol Oh, Seh-Won Ahn, William H. Steier, Harold R. Fetterman, and Cheng Zhang, "Flexible low-voltage electro-optic polymer modulators," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 82, No. 25, pp. 4432-4434, 2003.
- [6] Min-Cheol Oh, William H. Steier, Hyun-Chae Song, and Seh-Won Ahn, "Low-voltage flexible optic polymer modulators," US patent, US2005249445, 2005.
- [7] G. T. Paloczi, Y. Huang, and A. Yariv, "Free-standing all-polymer microring resonator optical filter," *Electron. Lett.*, Vol. 39, No. 23, 2003.
- [8] Sung-Hyun Nam, Jae-Wook Kang, and Jang-Joo Kim, "Temperature-insensitive flexible polymer wavelength filter fabricated on polymer substrates," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 87, 233504, 2005
- [9] U. Fisher, T. Zinke, J.-R. Kropp, F. Arndt, and K. Petterman, "0.1 dB/cm waveguide losses in single-mode SOI rib waveguides," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 8, no. 5, pp. 647-648, 1996.

Bragg Reflecting Waveguide Device Fabricated on a Flexible Substrate using a Nano-imprinting Technology

Kyung-Jo Kim, Jeong-Ah Yi, and Min-Cheol Oh[†]

Nano-Bio Photonics Lab., Department of Electronics Engineering, Pusan National University, Pusan (Busan), 609-735, Korea

[†] E-mail: mincheoloh@pusan.ac.kr

(Received March 7, 2007, Revised manuscript April 4, 2007)

Bragg reflecting waveguide devices have been fabricated on a flexible polymer substrate utilizing a post lift-off process which could provide excellent uniformity of grating patterns on plastic film. The 510 nm period Bragg grating pattern is made by two methods. In the first sample the grating is fabricated by exposing the laser interference pattern on a photoresist, and then it is inscribed by O₂ plasma etching. The grating pattern of the second sample is formed by a PDMS soft mold imprinting process. The selective adhesion property of SU-8 material for Au and Si surfaces is utilized to prepare a 100-mm thick plastic substrate. Single mode waveguide is fabricated on the plastic substrate using polymer materials with refractive indices of 1.540 and 1.430 for the core and the cladding layers, respectively. The Bragg grating on plastic substrate does not show any degradation in its spectral response compared to the reference sample made on a silicon wafer.

OCIS code : 230.1480, 130.0130, 230.7370.